

Т. А. Шмелева, П. В. Пикиноров

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДОТОКОВ

Рассмотрены вопросы моделирования динамики загрязнения водотоков. Проанализировано влияние процессов вторичного загрязнения, связанного с донными отложениями и смывом загрязняющих веществ с поверхности водосбора. Приведены результаты численного анализа.

Статья посвящена вопросам моделирования динамики загрязнения водотоков с учетом анализа поверхностного стока с прилегающей территории и влияния донных отложений.

Рассмотренный анализ основан на применении моделей так называемого «камерного типа» [1, 2, 5], в которых водоток разбивается на отдельные участки («камеры»), каждый из них характеризуется осредненными параметрами. Главная задача представленного в статье моделирования заключается в количественной оценке влияния процессов вторичного загрязнения, связанного с донными отложениями и смывом с поверхностным стоком, что не учитывается типовыми правилами нормирования [3, 4, 6], основанными на разбавлении.

Структурная схема, поясняющая процессы миграции загрязняющего вещества, приведена на рис. 1, где условными «прямоугольниками» в пределах одного моделируемого участка («камеры») выделены три кумулятивные зоны: водная среда, дно и поверхность водосбора.

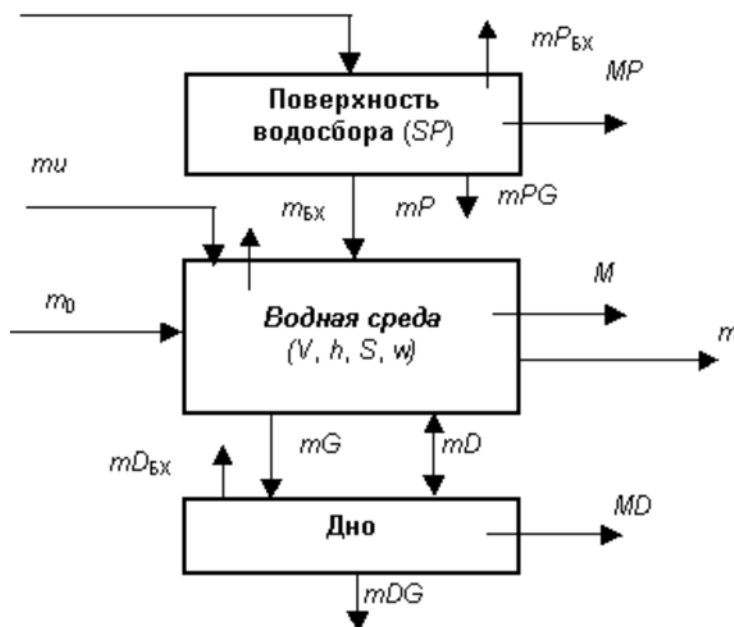


Рис. 1. Структурная схема массообменных процессов в кумулятивных средах

Модель учитывает следующие источники и составляющие массообмена загрязнителя:

- антропогенные сбросы в водоток $m_u(t)$ и на поверхность водосбора $m_{uP}(t)$;
- миграцию загрязняющих веществ вдоль русла: входной поток загрязнителя в камеру $m_0(t)$ и выходной поток $m(t)$;
- биохимический распад загрязнителя в трех кумулятивных зонах: $m_{B_вх}(t)$ — в воде, $m_{D_вх}(t)$ — на дне, $m_{P_вх}(t)$ — на поверхности;
- смыв загрязнителя с поверхностным стоком в русло $m_P(t)$;
- переход в связанное с почвогрунтами состояние $m_{PG}(t)$;
- переход в связанное с дном состояние $m_{DG}(t)$;
- диффузионный обмен «дно — русло» $m_D(t)$;
- гравитационное осаждение загрязнителя на дно $m_G(t)$.

Нестационарность гидрохимических процессов вызвана, прежде всего, сезонной гидродинамикой водотока и поверхностного водосбора. Основные компоненты нестационарной гидродинамики, обуславливающие миграцию и разбавление:

- $h(t)$ — уровень воды в камере;
- $h_P(t)$ — уровень поверхностной влаги

и связанные с ними

- $w(h(t))$ — площадь живого сечения русла (рис. 2);
- объемный расход основного потока воды в русле [7]

$$Q(h(t)) = w(h(t)) \cdot v(h(t)),$$

где скорость потока оценивается по выражению

$$v(h) = C \sqrt{J \frac{w(h)}{\chi(h)}} \approx \alpha_Q \cdot \sqrt{h(t)},$$

- (причем C — коэффициент Шези; J — уклон русла; $\chi(h)$ — так называемый смачиваемый периметр);
- объем воды в камере:

$$V(h) = w(h) \cdot l,$$

где l — длина камеры;

- $S(h)$ — площадь «зеркала» воды в камере;
- поверхностный сток

$$QP(h(t)) = \alpha_{P_q} \cdot SP \cdot hP(t) \cdot E(t), \quad (1)$$

где α_{P_q} — коэффициент скорости стока, определяемый по параметрам прилегающего к водотоку рельефа; SP — эффективная площадь поверхностного водосбора в камеру; $E(t) \in [0, 1]$ — функция сезонного замерзания ($E = 0$) и оттаивания ($E = 1$) (см. рис. 3).

Огрубленная схема гидробаланса воды в камере задается уравнением

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q_0(t) - Q(t) + QP(t), \quad (2)$$

где $Q_0(t)$ — входной поток, а интенсивность поверхностного стока (1) связывалась с уровнем $h(t)$ выражением* (см. рис. 3):

$$hP(t)E(t) = \alpha_h (h(t) - \underline{h})_+ \cdot E(t) \quad (3)$$

(в расчетах принято $\alpha_h = 1/20$).

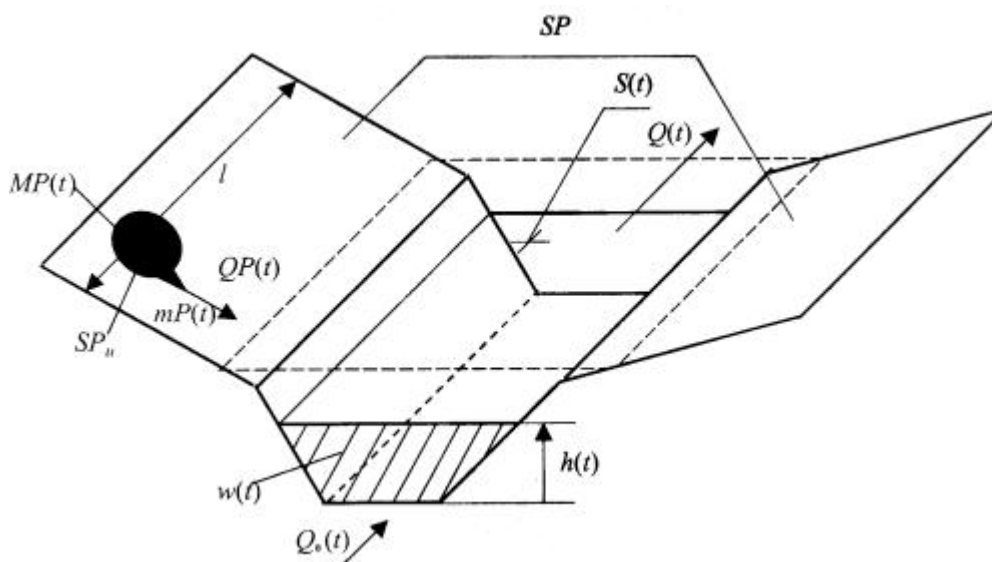


Рис. 2. Схема камеры

Основными переменными состояниями гидрохимической модели участка, подлежащими моделированию, являются концентрации загрязняющих веществ в воде — $C(t)$, в донных отложениях — $CD(t)$ и на поверхности — $CP(t)$, образованной объектом загрязнения площадью SP_u . Соответствующие массы загрязнителей в кумулятивных зонах вычисляются по выражениям:

$$M(t) = C(t) \times V(t), \quad MD(t) = CD(t) \times S(t), \quad MP(t) = CP(t) \times SP_u. \quad (4)$$

Тогда динамика гидрохимических балансов моделируемого участка согласно рис. 1 запишется в виде системы дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{M}(t) &= m_{\text{в}}(t) - m(t) + mP(t) - mD(t) - mG(t) - m_{\text{вх}}(t) + mu(t), \\ \dot{MD}(t) &= mD(t) + mG(t) - mDG(t) - mD_{\text{вх}}(t), \\ \dot{MP}(t) &= -mP(t) - mPG(t) - mP_{\text{вх}}(t) + muP(t), \end{aligned} \quad (5)$$

в которой основной массообменный поток связан с течением реки — это вход в камеру — $m_{\text{в}}(t) = Q_{\text{в}}(t) \times C_{\text{в}}(t)$ и выход — $m(t) = Q(t) \times C(t)$ ($C_{\text{в}}(t)$ — концентрация загрязняющего вещества во входном потоке). Параметры взаимосвязи с донными отложениями включают гравитационную составляющую

$$mG(t) = \alpha_G \cdot M(t) \quad (6)$$

и диффузионную

$$mD(t) = \alpha_D \cdot S(t) \cdot (C(t) - \chi^D \cdot CD(t)), \quad (7)$$

здесь α_G — скорость осаждения; α_D — интенсивность диффузии; χ^D — параметр равновесных состояний. Интенсивность поверхностного стока загрязнителя оценивается соотношением

$$mP(t) = \alpha_P \cdot QP(t) \cdot CP(t), \quad (8)$$

где α_P — доля захвата загрязнителя стоком.

Величина биохимического распада загрязнителя во всех трех зонах задается линейными моделями первого порядка

$$\begin{aligned} m_{\text{вх}}(t) &= \alpha_{\text{вх}}(\Theta_1(t)) \cdot M(t), \\ mD_{\text{вх}}(t) &= \alpha_{D_{\text{вх}}}(\Theta_2(t)) \cdot MD(t), \\ mP_{\text{вх}}(t) &= \alpha_{P_{\text{вх}}}(\Theta_3(t)) \cdot MP(t), \end{aligned} \quad (9)$$

в которых параметры скорости распада являются функциями средних температур $\Theta_i(t)$ в зонах: $i = \{1, 2, 3\}$. В расчетах соответствующие функции аппроксимировались кусочно-линейными сплайнами

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{вх}}(\Theta_1) &= \alpha_{\text{вх}}(\Theta_1)_+ + \alpha_{\text{вх}1}(\Theta_1 - 8)_+, \\ \alpha_{D_{\text{вх}}}(\Theta_2) &= \alpha_{D_{\text{вх}}}(\Theta_2)_+ + \alpha_{D_{\text{вх}1}}(\Theta_2 - 4)_+, \\ \alpha_{P_{\text{вх}}}(\Theta_3) &= \alpha_{P_{\text{вх}}}(\Theta_3)_+ + \alpha_{P_{\text{вх}1}}(\Theta_3 - 10)_+ \end{aligned}$$

Модель перевода поверхностных загрязнителей в «неподвижное» или связанное с зонами состояние

задается условиями

$$mPG(t) = \alpha P_2 \cdot E(t) \cdot MP(t),$$

$$mDG(t) = \alpha G_2(t) \cdot MD(t),$$

где временной фактор паводковых наносов, «закрывающих» донные отложения при интенсивном поверхностном стоке, учитывается функцией

$$\alpha G_2(t) = \alpha G_{20}(1 + 10 hP(t) \cdot E(t)).$$

В силу (6) — (10) система (5) переписывается следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d}{dt} V(t) \cdot C(t) &= -(Q(t) + \alpha D \cdot S(t) + \alpha G \cdot V(t) + \alpha_{\text{БК}}(\Theta_1(t)) \cdot V(t)) C(t) + Q_0(t) C_0(t) + \\ &+ \alpha D \cdot \chi D \cdot MD(t) + \alpha P \cdot \frac{QP(t)}{SP_u} \cdot MP(t) + mu(t), \\ \frac{d}{dt} MD(t) &= -(\alpha D \cdot \chi D(t) + \alpha G_2(t) + \alpha D_{\text{БК}}(\Theta_2(t))) \cdot MD(t) + \alpha D \cdot S(t) C(t) + \\ &+ \alpha G \cdot V(t) \cdot C(t), \\ \frac{d}{dt} MP(t) &= -\left(\alpha P \cdot \frac{QP(t)}{SP_u} + \alpha P_2 \cdot E(t) + \alpha P_{\text{БК}}(\Theta_3(t)) \right) \cdot MP(t) + muP(t). \end{aligned} \right. \quad (11)$$

Камерные (одномерные по пространственной координате) схемы анализа справедливы, если длина камеры l существенно превосходит ширину «зеркала» $b(t) = \frac{S(t)}{l}$. В этом случае реальная концентрация загрязняющих веществ в камере приближается к средней по объему — $C(t)$. Ориентируя последующий анализ на гидрологию малых рек Западной Сибири, в которых средняя скорость тока ограничена $v(h) \in [0,02-2]$ м/с, получаем, что время полного обновления воды в камере с типовыми размерами $b \times l = [10, 100] \times [100 \times 1000]$ м² лежит в пределах $\Delta\tau \in [0,014, 1,4]$ часов, что существенно меньше, чем собственная динамика массообменных процессов на дне и прилегающей поверхности, которая соизмерима с сезонными интервалами. Поэтому без ущерба для точности система (11) может быть переписана в виде

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\alpha G + \alpha_{\text{БК}}(\Theta_1(t)) + \alpha D \cdot \frac{S(t)}{V(t)} + \frac{Q(t)}{V(t)} \right) C(t) &= \frac{Q_0(t)}{V(t)} C_0(t) + \alpha P \frac{QP(t)}{V(t)} CP(t) + \\ &+ \alpha D \cdot \chi D \frac{S(t)}{V(t)} CD(t) + \frac{1}{V(t)} mu(t), \\ \dot{C}D(t) &= -(\alpha D \cdot \chi D(t) + \alpha G_2(t) + \alpha D_{\text{БК}}(\Theta_2(t))) \cdot CD(t) + \left(\alpha G \cdot \frac{V(t)}{S(t)} + \alpha D \right) \cdot C(t), \\ \dot{C}P(t) &= -\left(\alpha P \cdot \frac{QP(t)}{SP_u} + \alpha P_2 \cdot E(t) + \alpha P_{\text{БК}}(\Theta_3(t)) \right) \cdot CP(t) + \frac{1}{SP_u} muP(t). \end{aligned} \right. \quad (12)$$

где быстрая динамика гидрохимических процессов в воде редуцирована. Иными словами, реакция в воде столь быстротечна, что ее в системе (12) можно рассматривать как «мгновенную» (т. е. статическую). В результате получена расчетная модель, описывающая осредненные массообменные процессы в зонах, сопряженных с камерой.

Для моделирования приняты следующие исходные данные параметрического описания системы (13):

| | | | | | |
|--------|-----------------|--------------|--------------------|--|---------------------|
| l | 1000 | αP | 0,1 | αG_{20} | 0,05 |
| SP | 5×10^5 | αP_u | 3×10^{-5} | αP_2 | 0,05 |
| SP_u | 500 | χD | 0,1 | $\frac{\alpha_{\text{БК}}}{\alpha_{\text{БК}1}}$ | $\frac{0,05}{0,06}$ |

| | | | | | |
|--------------------|------|------------|------|-------------------------|-----------------------|
| \underline{h} | 1 | αD | 0,15 | $\frac{\alpha D_{E>Q}}$ | $\frac{0,015}{0,05}$ |
| α_{\square} | 0,03 | αG | 0,15 | $\frac{\alpha P_{E>Q}}$ | $\frac{0,001}{0,009}$ |

Графики зональных гидродинамических процессов приведены на рис. 3, где в относительных масштабах выделены: $h(t)$ — гидрограф, $QP(t)$ — поверхностный сток, $E(t)$ — сезонная функция снеготаяния.

Графики фонового поступления загрязнителя $m_0(t) = Q_0(t) \times C_0(t)$, прямого сброса в воду $mu(t)$ и на поверхность $muP(t)$ приведены на рис. 4. Кроме того, на рис. 4 указана функция массообмена со дном

$$mD_{\Gamma}(t) = \alpha G \cdot V(t) \cdot C(t) + \alpha D \cdot S(t) \cdot (C(t) - \chi D \cdot CD(t))$$

и массовый сток с поверхности $mP(t)$.

Результирующие концентрации, синхронизированные с гидрологией, также приведены на рис. 3, где кривая 1 соответствует упрощенной модели простого разбавления

$$Q(t)C_1(t) = Q_0(t)C_0(t) + mu(t),$$

кривая 2 учитывает массообменную динамику с донными отложениями, кривая 3 соответствует общему случаю с поверхностным поступлением загрязняющих веществ.

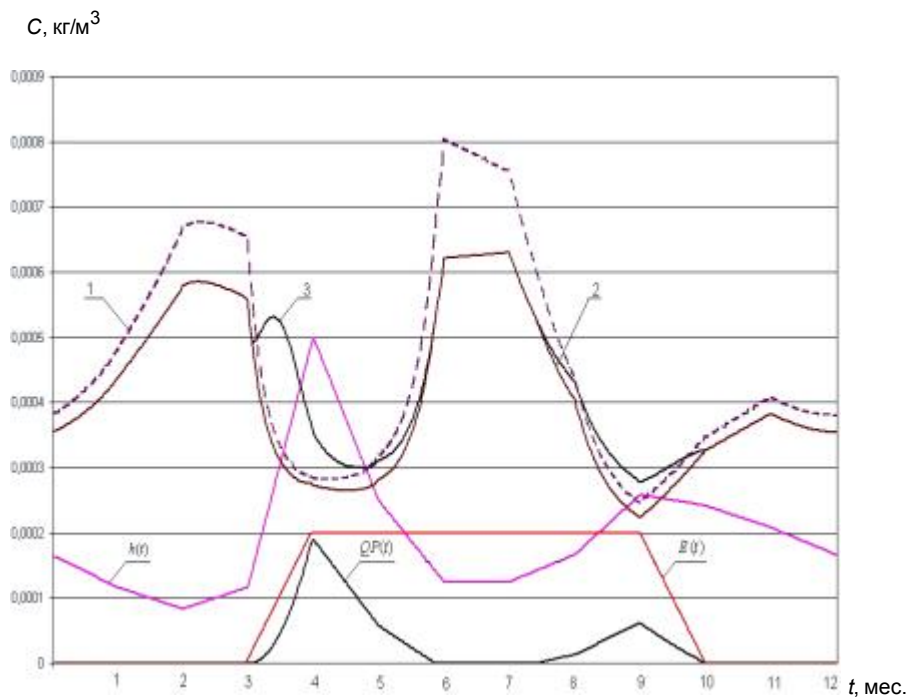


Рис. 3. Графики основных гидрохимических процессов в камере

m , кг/сут.

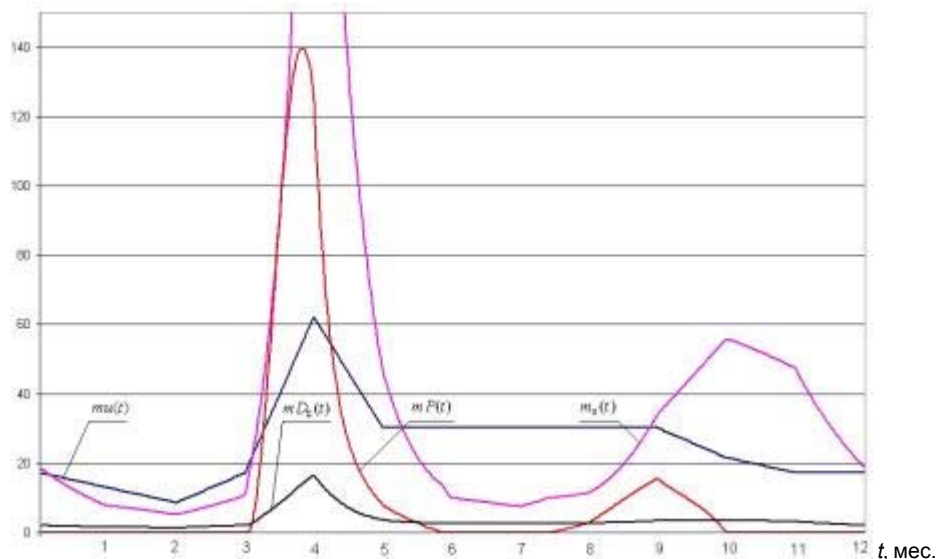


Рис. 4. Динамика поступления загрязняющих веществ в камеру

Анализ свидетельствует о том, что:

1) нормирование и прогнозирование состояния качества воды в водотоках требует создания адекватных моделей участков, учитывающих главные факторы и механизмы массообменных процессов в воде и прилегающих к руслу кумулятивных средах;

2) типовые методы нормирования сбросов, основанные на разбавлении, не гарантируют заявленных норм качества воды в случаях интенсивных поверхностных загрязнений прилегающих зон водосбора. Именно такая ситуация характерна для территорий нефтяных месторождений.

Таким образом, математические методы гидрохимического анализа позволяют качественно улучшить технологии управления состоянием окружающей среды и вплотную подойти к задаче комплексного нормирования нагрузки на водоток с одновременным учетом различных источников антропогенного воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анохин Ю. А., Горстко А. Б., Домешек Л. Ю. и др. Математические модели и методы управления крупномасштабным водным объектом. Новосибирск: Наука, 1987. 292 с.
2. Белоплицкий В. М., Шокин Ю. И. Математическое моделирование в задачах охраны окружающей среды / Под ред. Г. А. Сапожникова. Новосибирск: Инфолио-пресс, 1997. 240 с.
3. Вахов Д. Н., Соловьев И. Г. Вопросы группового нормирования сбросов в поверхностные водные объекты в районах нефтедобычи Тюменского Севера // Вестн. кибернетики. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2002. Вып. 1. С. 78–84.
4. Власов Е. В., Шмелева Т. А. Информационные технологии слежения и прогнозирования гидрологических режимов рек в задачах экологии // Криосфера Земли. 1998. Т. 2, № 3. С. 44–47.
5. Гурман В. И. Моделирование процессов в природно-экономических системах. Новосибирск: Наука, 1982. 160 с.
6. Шмелева Т. А., Вахов Д. Н. Геоинформационные технологии контроля за состоянием загрязненных участков нефтяных месторождений // Криосфера Земли. 1998. Т. 2, № 3. С. 36–43.
7. Штеренлихт Д. В. Гидравлика. М.: Энергоатомиздат, 1984. 640 с.

T. A. Shmeleva, P. V. Pikinero

A HYDRODYNAMIC MODEL OF WATERCOURSES' POLLUTION

The authors consider questions of simulating dynamics of watercourses' pollution. Subject to analysis being impact of secondary pollution associated with bottom sedimentation and washout of pollutants from watershed surface. The article cites the results of numerical analysis.

*) означает положительные значения функции в противном случае — ноль.